

## **SECADOR SOLAR HÍBRIDO. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

**M. Condori, R. Echazú, G. Duran, L. Saravia**

INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional. (UNSa-CONICET)

Universidad Nacional de Salta,

Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.

Te: 54-387-4255424, Fax: 54-387-4255489, email: condori@inenco.net

**RESUMEN:** Se presenta un secador solar destinado a la producción industrial de pimiento para pimentón, que cuenta con circulación forzada de aire y calentamiento auxiliar mediante un quemador de leña. Los aspectos constructivos y de diseño que se introducen representan una mejora tecnológica respecto de un secador solar con absorbedor fijo de lecho de piedras anteriormente desarrollado. Como consecuencia de los colectores de más alta eficiencia que se utilizan y de la incorporación de seguimiento diario de la altitud solar, se requiere menos de la mitad de área de colección que el secador fijo. Se introducen mejoras en el sistema de distribución de aire requiriéndose ahora un ventilador centrífugo de menor potencia. Las mejoras que se introducen en la eficiencia térmica del sistema llevarán a una mayor velocidad de secado durante el día con la consecuente disminución del uso de energía convencional.

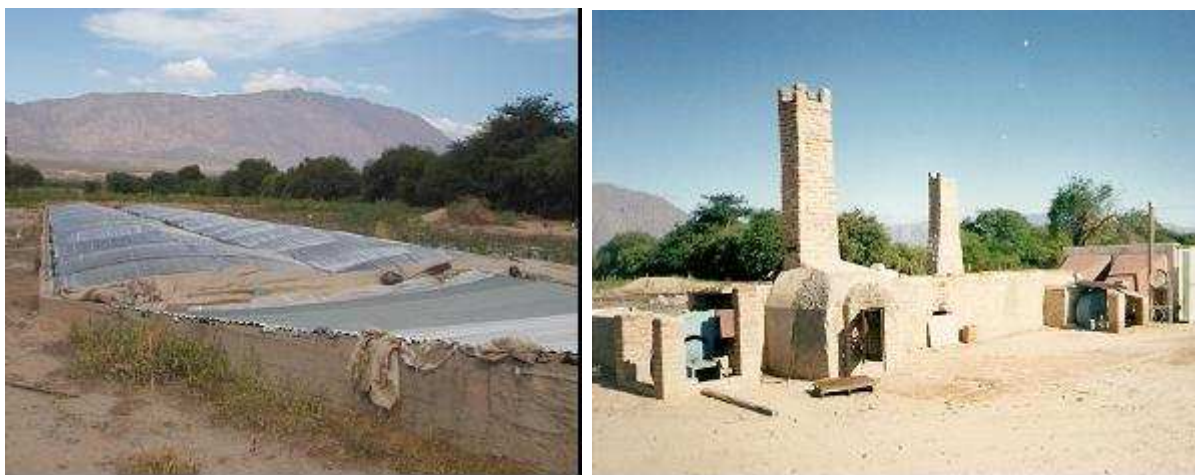
**Palabras Clave:** secador solar, colector solar de aire, eficiencia energética.

### **INTRODUCCIÓN**

La producción de pimiento para pimentón es una importante actividad económica de los Valles Calchaquíes en el Noroeste Argentino, provincias de Salta, Tucumán y Catamarca.

El pimiento se cultiva en suelo a mediados de la primavera, cosechándose desde fines de enero hasta mediados de abril. Una vez cosechado debe secarse para pasar luego a molienda y a envasado, perdiendo en la operación de secado aproximadamente el 80 % de su peso en fresco. Puesto que la humedad del aire en la zona de los Valles Calchaquíes es baja, el secado se realiza espontáneamente, siendo lo mas frecuente que los mismos agricultores sequen su producción al aire libre, por el sencillo procedimiento de desparramar los frutos sobre el suelo, donde permanecen entre 15 a 20 días.

Este modo de secado tradicional, conocido como "secado en cancha" no permite obtener una buena calidad del producto seco, ya que al aire libre se contamina con tierra, insectos, microorganismos, etc. además de perder buena parte del color inicial al descomponerse los pigmentos por acción de la radiación solar.



*Figura 1: a la izquierda los colectores de piedra y a la derecha los dos quemadores de leña con sus respectivos ventiladores*

Se han propuesto y aplicado diversos procedimientos para realizar el secado en forma mas controlada, con energía solar, con aporte de energía de combustibles y mediante sistemas mixtos. En particular el INENCO ha desarrollado sistemas activos de secado solar, entre los que se destaca el construido en Cachi, provincia de Salta, a principio de los '80 (Saravia et al, 1983; 1984).

El secador solar de Cachi operó por poco tiempo debido al cese de actividades de la cooperativa que lo tenía a cargo, pero su diseño se aplicó en experiencias posteriores y en particular fue tomado por productores de San Carlos, Salta, quienes a partir de una publicación de ASADES (Saravia et al, 1983) construyeron con recursos propios un sistema similar. La transferencia fue realizada por la empresa ADIT-AL, de R. Berger y M. Vargas, quienes construyeron a comienzo de los '90 el secador solar de San Carlos, que funcionó originalmente como solar puro, luego como híbrido solar-propano y mas recientemente como híbrido solar-leña (Berger, 2004). El sistema consta de un colector solar de piedras de 500 m<sup>2</sup>, un túnel de secado con capacidad de 30 carros de 100 kg de pimiento fresco, el sistema de energía auxiliar y dos ventiladores centrífugos que impulsan el aire en un circuito abierto. Operando con energía auxiliar produce 500 kg diarios de pimiento seco. En la figura 1 se muestra dos fotos del secador mencionado.

## SECADOR DE PIMIENTO MEJORADO

En los últimos años se trabajó con nuevos diseños de calentadores solares de aire de alta eficiencia para secadores solares industriales. En particular se realizó el diseño y la construcción de dos secadores solares activos, de media tonelada de carga cada uno, para las condiciones climáticas de la comunidad de Huacalera (Lat.: 23° 26" S y long: 65° 21" O), Quebrada de Humahuaca, donde funciona una planta de deshidratado de hortalizas. También se realizó una evaluación experimental de los mismos, que sirvió para poner a punto los detalles constructivos y realizar las adaptaciones necesarias del diseño original. En estos equipos el calentamiento del aire se realiza sólo con energía solar provista por el banco de colectores de aire, siendo la cámara de secado, opaca a la radiación solar incidente (Condorí, 2006, 2007).

Sobre la base de la experiencia con estos trabajos y la implementación de un programa de simulación del sistema, (Condorí, 2005), se diseñó y se construye un secador solar activo híbrido para el deshidratado de pimiento para pimentón, de dos toneladas de capacidad de carga, donde el calentamiento de aire se puede realizar tanto por vía solar como por medio de un quemador de biomasa. Al presente se está concluyendo el montaje de este sistema, en San Carlos, Salta en el mismo predio del secador mencionado en la introducción. Un esquema de planta del secador híbrido se presenta en la figura 2, mientras que en la figura 3 se presenta una vista lateral sur del mismo. A continuación se presenta el diseño y los aspectos constructivos del secador solar híbrido.

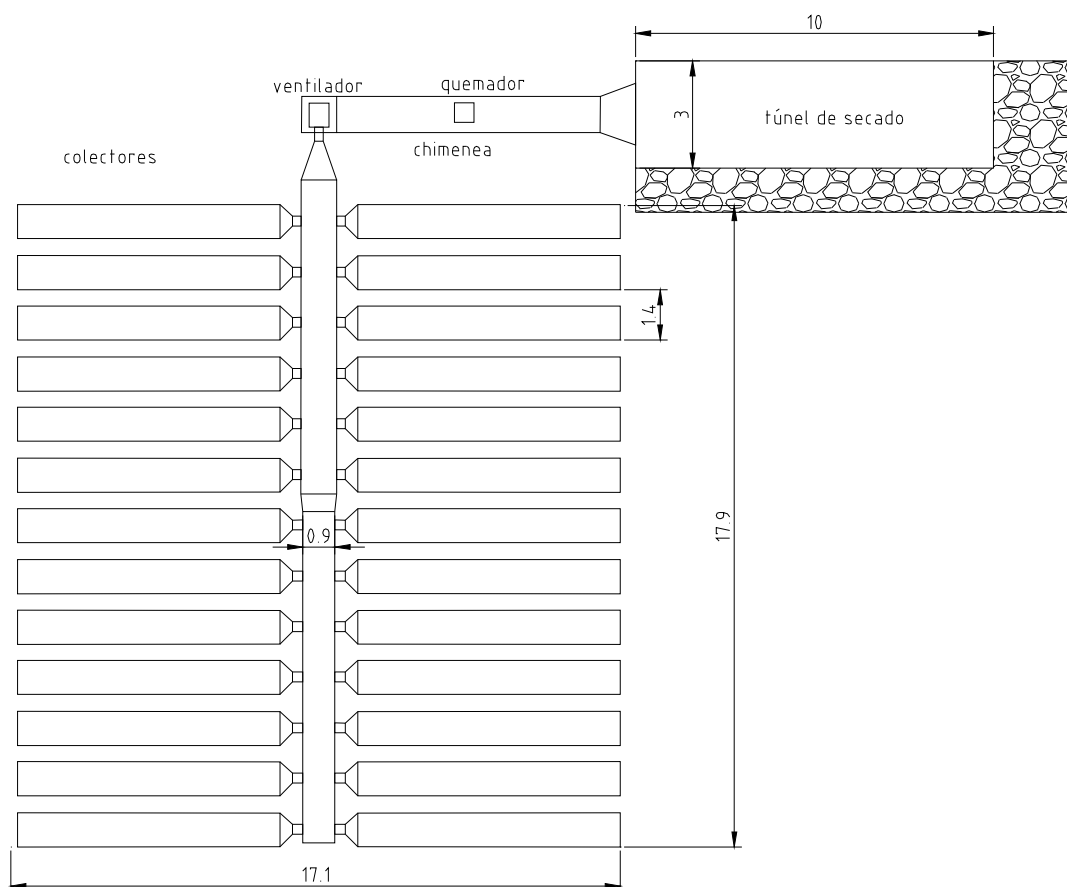
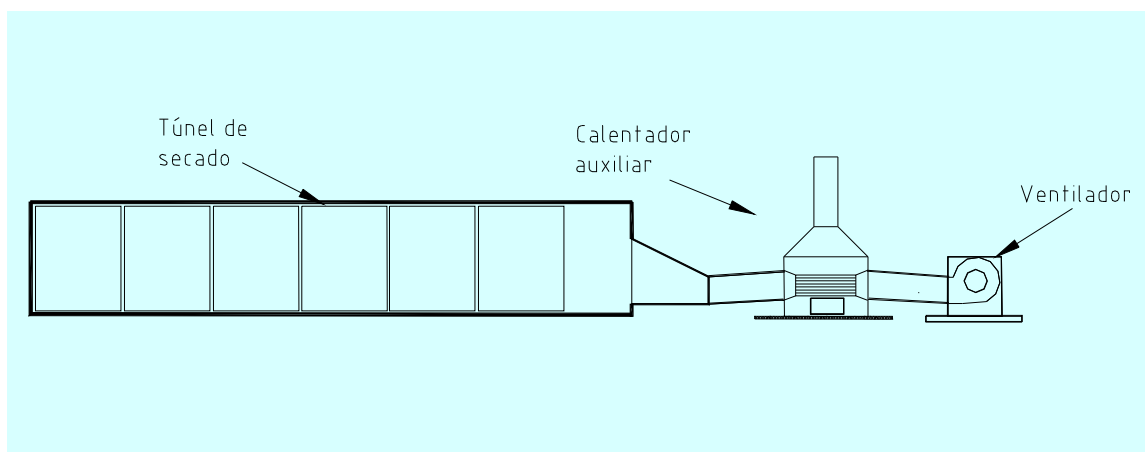


Figura 2: Vista de planta del Secador Solar Híbrido de pimiento para pimentón de San Carlos, Salta

El movimiento de aire se realiza mediante un ventilador centrífugo eléctrico. Este ingresa un determinado flujo de aire ambiente a cada colector, que lo recorre longitudinalmente aumentando su temperatura. En la boca de entrada de cada colector se coloca un filtro de fibra sintética para hacer una limpieza del polvo grueso evitando así que por un lado se ensucie el absorbedor del colector rápidamente y por otra parte que el producto limpio que se encuentra en la cámara de secado se contamine. El aire caliente que sale de los colectores ingresa al caño maestro donde se suma el aporte de todos los colectores, obteniéndose la temperatura adecuada para el proceso de secado en la cámara. La velocidad del flujo de aire en el caño maestro no es muy elevada por lo que se puede producir sedimentación por gravedad de cualquier resto de polvo que pase la primera barrera, ayudando así a la limpieza del aire que ingresa a la cámara. El aire caliente que sale del caño maestro con el caudal adecuado, pasa por el ventilador centrífugo hacia la cámara de secado. En el interior de esta última se encontrará, con el producto a deshidratar dispuesto en bandejas de mallas.

Finalmente, el aire ya húmedo sale de la cámara de secado por dos ventanas ubicadas en la puerta de ingreso del producto fresco, desde donde es desechando a la atmósfera. Estas ventanas también cuentan con filtros de fibra sintética para evitar el ingreso de polvo o insectos.



*Figura 3: Vista de planta del Secador Solar Híbrido de pimiento para pimentón de San Carlos, Salta*

El caño maestro de colección divide simétricamente el banco de colectores. Se colocan 13 conexiones a ambos lados. El caño maestro se une al ventilador mediante un acople metálico que pasa de cuadrado a redondo. El ventilador es centrífugo de 4 HP, con acople a transmisión, el mismo fue adaptado de uno ya existente. Se conecta la salida del ventilador a un intercambiador de calor gas-aire y la salida de este a una conexión tipo difusor. Este difusor se conecta a su vez al túnel de secado y permitirá que el aire que ingresa a la cámara de secado incida con mayor uniformidad sobre los carros con producto, a fin de lograr un secado parejo entre las bandejas.

Los colectores y el caño maestro trabajan en depresión debido a la succión del ventilador, mientras que la cámara de secado lo hace en sobre presión. El aire caliente entra por un extremo de la cámara de secado y lo recorre hacia el otro pasando entre las bandejas con producto, las que se colocan sobre carros. El movimiento de los carros es a contracorriente del aire lo que produce un gradiente de secado en la dirección del flujo de aire. La estrategia de funcionamiento de un día normal de trabajo consiste en sacar por una puerta lateral de la cámara, próxima al ingreso del aire caliente, los carros con productos secos, mientras se introducen por la puerta principal los carros con productos frescos, desplazando las dos columnas de carros hacia adelante.

El banco de colectores trabaja en serie con un quemador de leña, lo que permitirá regular el funcionamiento día-noche. Durante un día de buena radiación solar sólo se implementará el funcionamiento del banco de colectores. Durante la noche o cuando se necesita elevar la temperatura de salida de los colectores, será necesario poner en funcionamiento la generación auxiliar de calor. Si durante el día la temperatura del aire en la cámara se coloca por encima de los 60 °C, se pueden abrir reguladores tipo persiana colocados en el último tramo del caño maestro antes del ventilador, para permitir el ingreso de aire ambiente más frío y bajar así la temperatura en la cámara de secado.

La superficie total ocupada por el secador es de aproximadamente 345 m<sup>2</sup>, de los cuales el banco de colectores y el caño maestro utilizan 306 m<sup>2</sup>. De estos, 195 m<sup>2</sup> los ocupan los colectores, mientras que el resto incluye las conexiones y el área de paso. A la cámara de secado y al tramo del ventilador y quemador de biomasa les corresponden los 39 m<sup>2</sup> restantes.

#### *Banco de Colectores*

El número total de colectores es de 26, distribuidos en dos grupos de 13 que se colocan a ambos lados del caño maestro. La separación de eje a eje entre colectores, que se obtuvo por el estudio de sombras, es de 1,4 m, quedando casi 0,40 m entre colectores para permitir la circulación, evitar el sombreado entre ellos y para evacuar el agua de lluvia.

Los colectores son cajas de chapa galvanizada de 0,94 m de ancho, 7,5 m de largo y 0,1 m de alto. Son rebatibles para optimizar su pendiente respecto a la altitud del sol. En términos medios, y de acuerdo a ensayos con un prototipo construido, en condiciones óptimas de funcionamiento por cada colector debe circular un caudal de aire de 600 m<sup>3</sup>hr<sup>-1</sup> con una velocidad

de  $1,8 \text{ ms}^{-1}$ . De acuerdo a la simulaciones, validadas con la experiencia, con este flujo el colector opera con una eficiencia aproximada del 50 %, proporcionando una temperatura de salida en el rango de los  $50^\circ\text{C}$  con una radiación solar media diaria mensual de  $500 \text{ Wm}^{-2}$ .

La cara exterior del colector está construida en chapa galvanizada lisa plegada en los laterales. La cara interior con aislamiento térmico en lana de vidrio de 5 cm de espesor con lámina aluminizada reforzada. Se han evitado los puentes térmicos entre ambas para reducir las pérdidas térmicas. El absorbedor se construye en chapa galvanizada ondulada pintando de negro mate la cara superior. Está separado del fondo por aproximadamente 5 cm existiendo circulación de aire por abajo y por arriba de la chapa. La cubierta superior es de policarbonato alveolar transparente de 4 mm de espesor. El cierre entre la cubierta y el cajón se realiza con sellador siliconado y con ángulos de chapa galvanizada sujetos con remache.

Cada cajón tiene 2,44 m de largo y se coloca en los extremos bastidores de caño estructural de 0,02 m de lado, en forma de C, soldando un caño redondo en la base del lado largo. Estos se sujetan al cajón mediante remaches rápidos y se utilizan para unir tres cajones entre sí hasta obtener una tira de aproximadamente 7,5 m de largo.

Para mejorar la incidencia de radiación se incorporó un sistema sencillo de seguimiento diario de la altura del sol que prácticamente permite que los colectores sean rebatibles. Para lo cual se colocan cuatro soportes triangulares de hierro ángulo de 0,02 m de lado fundados en suelo, que terminan en caño redondo. Entre el caño redondo de los soportes y el de los colectores se atraviesa otro de menor diámetro. Así, el ángulo de la pendiente del colector con la horizontal puede variarse de acuerdo a la altitud del sol a lo largo del día para mejorar la eficiencia de captación solar (ver figura 4). Como con este sistema el colector gira prácticamente sobre el eje longitudinal del fondo del cajón, fue necesario realizar modificaciones sobre la campana de acople al caño maestro, antes se conectaba mediante caño flexible de aluminio a un ramal a  $45^\circ$  y ahora se embute directamente con entrada a  $90^\circ$ .



*Figura 4: Sistema de rotación de los colectores. Permite el seguimiento de la altura del sol durante el día.*

#### *Caño Maestro*

El extremo de cada colector se une al caño maestro que a su vez se une al ventilador. Para esto se construye una campana de reducción que proporciona una unión prolija y reduce las pérdidas de carga, para permitir el uso de ventiladores de menor potencia. En el extremo redondo de la campana de reducción se coloca una llave tipo mariposa para controlar el flujo de aire. Esta llave permitirá que cada colector trabaje con un flujo de aire adecuado a fin de mantener la eficiencia del sistema. Como se dijo, la reducción se une al caño maestro en forma directa a  $90^\circ$ . Si bien, no es el mejor ángulo para reducir las pérdidas de carga, evita el uso de conexiones flexibles y permite la rotación de los colectores sobre un eje longitudinal.

La campana de reducción se construye en chapa galvanizada que pasa de la sección rectangular del colector, 0,10 m de alto y 0,94 m de ancho, a una circular de 0,27 m de diámetro. El colector se une con sellador y remaches a la campana, mientras que se inserta en un agujero del mismo diámetro, en el caño maestro. En este acople se coloca una llave tipo mariposa, que gira  $90^\circ$  entre flujo abierto y cerrado, para controlar el paso de aire. Este sistema de regulación permitirá mantener la eficiencia térmica del sistema, para lo cual se calibrará adecuadamente cada colector para que trabaje con un flujo de aire similar fijando el paso de la llave mariposa.

El caño maestro propiamente dicho tiene aproximadamente 18 m de largo y está compuesto por dos tramos de secciones 0,90 m y 1 m de anchos y 0,30 m y 0,5 m de alto, respectivamente. El aumento de sección permite equilibrar la presión por la suma de flujos de cada colector, de manera de evitar un aumento brusco en la velocidad del aire, lo cual aumentaría las pérdidas de carga. Cada sección del caño es un cajón rectangular de chapa galvanizada. El caño maestro tiene 26 bocas de acople, divididas simétricamente en 13 para el este y el oeste.



La última sección del caño maestro se une al ventilador mediante un acople que lleva la sección cuadrada de 1 m por 0,50 m de lado, a una circular de 0,25 m de diámetro que coincide con la boca de entrada del ventilador. No se ha colocado en esta etapa, pero de ser necesario se puede colocar en una de las caras de la sección un registro de ingreso de aire ambiente para mezclarlo con el aire caliente que proviene de los colectores y así bajar la temperatura en la cámara de secado.



*Figura 5: Vista interior del caño maestro. Se observa las conexiones redondas con cada colector y en rojo las llaves esclusas con cierre tipo mariposa..*



*Figura 6: Foto de la construcción del banco de colectores y el acople del caño maestro al ventilador centrífugo.*

#### *Cámara de Secado*

El aire caliente ingresará a la cámara de secado atravesando un difusor construido en chapa negra y aislado térmicamente. La entrada del difusor es una sección rectangular igual a la boca de salida del banco de tubos y el otro extremo, el de ingreso a la cámara de secado, termina en una sección de 2 m<sup>2</sup>.

La cámara de secado es un túnel con las siguientes medidas internas: 1,85 m de alto, 10 m de largo y 3 m de ancho. El túnel tiene estructura de caño de 40 mm de lado en los verticales y de 40 mm por 20 mm en los horizontales. La estructura se fija al piso mediante tornillos tirafondos. El piso tiene aislamiento térmico con placas de poliestireno de 5 cm de espesor, por encima de éstas se coloca malla sima y se construye una carpeta de concreto reforzado alisado. Se asegura un buen cierre entre la estructura y el piso colocando burletes de goma.

El interior está revestido con chapa galvanizada lisa en las paredes y con chapa galvanizada ondulada en el techo. Todas las uniones entre chapas están selladas y unidas a la estructura con remaches. El exterior está revestido con chapas galvanizadas onduladas y sujetas a la estructura con tornillos. Entre el revestimiento interior y exterior se coloca aislamiento térmico en lana de vidrio de 5 cm con barrera para la humedad en papel plastificado.



*Figura 7: Foto de la construcción de la cámara de secado Puerta de entrada de producto fresco. Se observa el difusor al fondo.*

La estructura considera dos puertas de acceso y una lateral de salida para los carros. Las puertas de acceso consisten de dos hojas de 1,50 m por 1,85 m cada una, donde la parte inferior es ciega, construida con caño estructural, chapa galvanizada lisa y aislamiento térmico en lana de vidrio; y la superior contiene una ventana de 0,5 m<sup>2</sup> para la salida del aire. Allí se coloca un filtro sintético para evitar la entrada de insectos y de polvo. La salida de los carros se hace por la puerta colocada en el lateral del túnel. Esta es una sola hoja ciega de idénticas dimensiones que las anteriores, expuesta a una sobre presión del aire que ingresa al túnel, por ello se colocan burletes de goma para disminuir las filtraciones de aire.

A uno de los lados del túnel de secado, que coincide con la puerta lateral de descarga, se construye un piso de cemento de 1,2 m de ancho, para permitir la circulación de los carritos. Este piso se extiende hasta más allá de la puerta de carga, donde se une con otro piso conectado a la planta.

En el interior de la cámara se pueden ubicar 12 carros distribuidos en 2 filas, que pueden transportar 15 bandejas de 1,5 m<sup>2</sup> de área cada una. El carro es una estructura metálica con ruedas, para facilitar su desplazamiento, de altura total 1,80 m incluidas las ruedas. La construcción de los carros se realiza con caño estructural y hierro ángulo, y se colocan las bandejas con 10 cm de separación entre sí. La separación entre las dos filas de carros ellos y entre estos y las paredes de la cámara es de 5 cm.

Las bandejas consisten de un marco de estructura metálica con una base de material reticulado o perforado para permitir la circulación del aire a través del producto. Se utilizan mallas plásticas tipo media sombra. La densidad de carga de las bandejas es de 9 kgm<sup>-2</sup> y cada carro carga aproximadamente 200 kg de producto fresco, siendo 2400 kg el total para la cámara de secado.

## CONCLUSIONES

Se presentaron el diseño y los detalles constructivos de un secador solar híbrido para dos toneladas de carga de producto fresco de pimiento para pimentón. Este secador representa una mejora de un secador con colector de lecho de piedra con el que una empresa de San Carlos, Salta, viene operando desde hace más de 10 años. Se ha mejorado particularmente el sistema de colección de radiación solar, se pasa de un colector de lecho fijo sobre plano horizontal a un banco de colectores con giro sobre su eje longitudinal, con los que se puede realizar un seguimiento diario de la altitud del sol, aumentando la intensidad de radiación que incide sobre el área de colectores. Este hecho sumado al uso de mejores materiales, mejorará la eficiencia instantánea de los colectores aproximadamente hasta el 50 % al medio día solar, de acuerdo a las simulaciones de diseño. En consecuencia el área de colección necesaria para realizar el secado se verá reducida a poco menos de 200 m<sup>2</sup>, de los 500 m<sup>2</sup> que se utilizaba anteriormente en el lecho de piedra.

Actualmente para alcanzar la temperatura de secado requerida en la cámara, 50 °C, el colector de lecho de piedra tiene 50 m de largo. Se ha observado que por encima de los 30 m la relación entre el costo y el salto de temperatura obtenido resulta desfavorable. En el caso del banco de colectores rebatibles, la eficiencia térmica de los mismos se ve aumentada por la mayor radiación incidente, por el uso de flujo de aire por arriba y por debajo del absorbedor y por la mejor aislamiento térmica. De la experiencia con un prototipo construido se estima que sólo se requerirán 7,5 m de longitud de colector metálico para obtener a la salida la temperatura deseada. La disminución de las dimensiones, particularmente la longitud, el uso de superficies suaves y un flujo de aire ajustado al mínimo requerido para secar la carga en un día, permitirá reducir también la potencia y el número de ventiladores utilizado, a uno solo de 4 HP.

En cuanto al funcionamiento con el sistema híbrido se ha preferido continuar con la conexión en serie entre este y el banco de colectores. Esta estrategia garantizará el secado del producto en cantidades industriales en uno o dos días de sol, manteniendo el ritmo de producción actual pero reduciendo la cantidad de biomasa debido a los mejores niveles de secado conseguidos durante el día con el sistema solar. En este sentido las mejoras introducidas permitirán un ahorro energético por un uso más eficiente de la energía de ambas fuentes de energía.

## REFERENCIAS

- Berger R. (2004) *Una Experiencia de Integración Vertical*. Primer Seminario Nacional sobre Pimiento para Pimentón en los Valles Calchaquies, Consejo Federal de Inversiones, Amaicha del Valle, Argentina.
- Condori M. (2005). *SECASOL, para Windows*. Software para el diseño y simulación de secadores solares indirectos. Registro de derecho de autor.
- Condori M., Echazú R., Saravia L. (2006) *Secador Solar Industrial para la Quebrada de Humahuaca*. Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.19, (1), pp.25-31, ASADES, Argentina.
- Condori M., Duran G., Echazú R., Saravia L. (2007). *Ensayo y Medición de un Secador Industrial tipo Túnel en el Norte Argentino*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, (2), pp. 37-44, ASADES, Argentina.
- Duffie, J. A. and Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of thermal Processes*, 2a. Edition, pp. 268-290. Wiley Interscience, New York.
- Saravia L., Echazu R., Guerrero F., Gramajo C. (1983). *Planta Piloto de Secado Solar de Pimiento: Construcción y Ensayo*. Actas de la 8a. Reunión de Trabajo de Energía Solar, La Pampa, pp. 1-7, Argentina.
- Saravia L., Passamai V., Echazú R. (1984). *Secado Solar de Pimiento: Resultados Experimentales y su Simulación*. Actas de la 9a. Reunión de Trabajo de Energía Solar, San Juan, pp. 1-7, Argentina.

## ABSTRACT

An industrial sweet pepper solar drier with forced airflow and auxiliary heating using a biomass stove is presented. The building and design detail that are introduced represent a technological improve in reference to a one solar drier with stone fixed absorber before developed. As a result of the collector high efficiency and the daily solar altitude tracking system that are used, the improved drier need a minor area in the collector bank. Also, other improves are introduced in the distribution of air system required a smaller centrifugal fans with the consequent energy save.

**Keywords:** solar drying, solar air collector, energy efficiency